

The SVD Analysis of the Tropical MJO Energy Changes in El Niño Event

Yi Yu, Yi Zhou, Shuzhuang Sun

Weihai Meteorologic Bureau, Weihai Shandong
Email: yy1819@126.com

Received: Sep. 27th, 2017; accepted: Oct. 18th, 2017; published: Oct. 26th, 2017

Abstract

The tropical MJO behaves as a baroclinic structure in the vertical direction. The convective activity is dominated by the divergence of the upper wind field and the convergence of the lower wind field. The stronger the convective activity is, the stronger the MJO energy is. When the sea surface temperature (SST) increases, the local convection will develop. This leads some positive effects on the MJO energy. Therefore, in the El Niño event process, due to SST abnormal changes, MJO energy will also fluctuate. In this paper, the SVD analysis between SST and the energy of MJO indicates that the MJO energy is high when the sea surface temperature anomaly (SSTA) is high and the MJO energy is low when the SSTA is low. There is a significant positive correlation between the SSTA and the MJO energy.

Keywords

MJO, El Niño, SST, SVD, Positive Correlation

关于El Niño事件过程中热带MJO能量变化的SVD分析

于毅, 周艺, 孙树壮

威海市气象局, 山东 威海
Email: yy1819@126.com

收稿日期: 2017年9月27日; 录用日期: 2017年10月18日; 发布日期: 2017年10月26日

摘要

热带MJO垂直方向表现为斜压结构, 其对流活动以上层风场辐散、下层风场辐合为标志, 对流活动越强,

MJO能量越强。当海表面温度(SST)升高,局地对流活动就会发展,从而对MJO能量产生积极影响。所以,理论上在El Niño事件过程中,由于SST异常变化,MJO能量也会产生波动。本文通过进行海表面温度(SST)场与MJO能量场之间的SVD分析,得出结论:当海表面温度异常(SSTA)偏高时MJO能量异常偏大;当SSTA偏低时MJO能量异常偏小,两者之间的正相关性表现良好。

关键词

MJO, El Niño, SST, SVD, 正相关

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

El Niño 事件是指东太平洋异常增暖并且暖区向西扩展,或者赤道中东太平洋出现大范围增暖,并且暖区由西向东扩展的现象,集中反映了热带地区的大尺度海气相互作用。它没有准确的周期,但是长时间的资料统计分析表明,一般 2~7 年将出现一次,因此是海洋中的一种低频变化现象,它不仅存在于热带海面温度和洋流强度等要素场的变化中,而且在全球大气环流和气候的年际变化中也都有清楚的反映,对全球范围内许多地方的降水、气温要素等有显著影响,但对不同地区,其影响的方式、强度及稳定性不同,表现出显著的区域性特征。

大气季节内振荡信号是在 20 世纪 70 年代初,由 Madden 和 Julian [1] [2]最先发现的,他们在研究热带大气时发现风场和气压场存在 40~50 天周期性的大尺度振荡现象,因此学术界也称此振荡现象为 MJO (Madden—Julian Oscillation)。MJO 是热带大气最强的振荡信号,它的活动及异常变化对热带气候有着重要的影响。

El Niño和MJO是两种不同时间尺度的现象,但与这两种不同时间尺度现象相关的异常对流活动和环流在空间分布上有很大的相似性,Lau和Chan [3]在1986年提出一种推测,即热带大气季节内振荡通过海气耦合作用而减频增幅,可能成为El Niño的激发因素。李崇银[4] [5]从动力学理论分析和数值模拟方面研究指出:一方面,El Niño事件发生之前热带大气(尤其是赤道西太平洋地区)季节内振荡异常增强,显示了热带大气季节内振荡对El Niño的激发作用;另一方面,El Niño对MJO的强度有削弱作用,在El Niño期间热带大气季节内振荡偏弱。前人通过大量研究指出El Niño和MJO之间存在密切的联系,本文从能量角度,通过进行海表面温度(SST)场与MJO能量场之间的SVD分析来确定El Niño事件过程中MJO强度的变化。

2. MJO 强度的定义

为了研究MJO能量与El Niño之间的关系,首先要确定一个合理的MJO强度指数,前人研究中根据具体情况定义了不同的MJO强度指数,如Lau and Chen [6]和Weickmann [7]等确定了MJO活跃的关键区或关键点,用关键区区域平均的OLR序列或关键点的OLR序列做为指数;Knutson [8]等用速度势等要素的EOF主分量做为指数;李崇银等[9]和何金海[10]等用振荡风场的低频动能作为研究的指数;Zhang [11]等用OLR与850mb纬向风SVD第一模态的扩展系数作为研究指数;Slingo [12]等用对流层上层纬向风沿赤道的纬向平均[u]作为指数;陈兴跃[13]等采用主要波的MJO时空功率谱值与总时空功率谱值的比值作为指数

等, 每种指数都有各自的优点。本文根据研究目的, 采用季节内OLR序列作为MJO指数, 以能量来确定MJO的强度, MJO能量的计算以季节内OLR序列的平方为标准。

3. 采用的资料、资料处理方法、分析方法

3.1. 采用的资料

1) NCAR/NOAA 逐日向外长波辐射(OLR)资料, 分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 起止时间: 1980年1月1日~2008年12月31日。

2) AVHRR 逐日海表面温度(SST)资料, 分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 起止时间: 1981年9月1日~2008年12月31日。

3.2. 资料处理方法

为了从原始 OLR 资料中获得需要的季节内资料, 将原始数据做如下处理:

1) 去除季节循环

在大气要素时间序列总方差中, 季节循环的方差很大, 但不是所要分析的目标, 所以先从原始资料序列去除季节循环。

具体的过程: 进行谐波分析, 分离出周期为 ∞ , 频率为 0 的波分量, 周期为年的第一谐波分量和周期为半年的第二谐波分量, 然后将 0 波, 1 波和 2 波从原始资料中去除, 这样就得到了去除季节循环后的 OLR 时间序列。

2) 滤波

在分析时间序列的周期中, 我们往往采用一定的方法先滤掉一些不需要的周期, 以突出我们要研究的周期, 这一过程称为滤波过程。滤波过程实际上是对原始序列经过一定的变换转化为另一序列的过程。

本文主要分析研究季节内信号, 所以采用 Butterworth 滤波器进行带通滤波, 将 20~90 天信号提取出来进行分析, 分析使用的新时间序列即为 MJO 分量。

3.3. 分析方法

在大气和海洋科学研究中, SVD (Singular Value Decomposition)是比较常见的分析方法, 主要是用来分析两个物理量场之间的耦合特征, 下面介绍一下 SVD 方法的基本原理。

假设现在有两个变量场, 这里称一个场为左场, 由 p 个空间点构成, 样本量为 n , 记为矩阵形式 X , 另一个称为右场, 由 q 个空间点构成, 样本量亦为 n , 记为 Y , 且 X, Y 中元素均已作过标准化处理:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{p1} & x_{p2} & \cdots & x_{pn} \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{q1} & y_{q2} & \cdots & y_{qn} \end{pmatrix}$$

假设两场之间交叉协方差矩阵为 $S_{p \times q}$, 对于任何一个 $p \times q$ 阶非对称矩阵 S 的奇异值分解, 都可以得到:

$$S = L \begin{bmatrix} \Lambda_m & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} R' \quad (2-1)$$

(2-1)式的分量形式为:

$$S = \sum_{k=1}^m \lambda_k l_k \gamma_k', \quad m \leq \min(p, q) \quad (2-2)$$

这里向量 l_k 有 m 个, 相互正交, 称为左奇异向量, 向量 γ_k 有 m 个, 亦相互正交, 称为右奇异向量。

SVD 方法的目的就是要找到两个变量场的线性组合, 即由左右两场分别构造两个矩阵:

$$U = L'X \quad (2-3a)$$

$$V = R'Y \quad (2-3b)$$

为了唯一分解(2-1)式, 令 L 、 R 为正交化向量的条件, 即:

$$LL' = I \quad (2-4a)$$

$$RR' = I \quad (2-4b)$$

同时使矩阵 U 、 V 之间有极大化协方差:

$$COV(U, V) = L'SR = \max$$

根据条件极值求解, 可以推导出:

$$\begin{aligned} S'L &= \lambda_k R \\ SR &= \lambda_k L \end{aligned} \quad (k=1, 2, 3, \dots, m) \quad (2-5)$$

(2-5)式写成矩阵形式后即为(2-1)式。非负值 λ_k 为特征值, 在奇异值分解中称为奇异值, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$ 。对称矩阵 $S'S$ 的特征值和特征向量为 λ_k 和 R , SS' 的特征值和特征向量为 λ_k 和 L 。两个矩阵的特征值是相同的, 即:

$$\begin{cases} (SS' - \lambda_k I) = 0 \\ (S'S - \lambda_k I) = 0 \end{cases} \quad (2-6)$$

用 L 左乘(2-3a)式, 并运用(2-4a)式导出左变量场的展开式:

$$X = LU \quad (2-7)$$

其中 U 为左场的时间系数矩阵, 记为向量形式:

$$U(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_m(t) \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

同理, 右变量场展开式

$$Y = RV \quad (2-9)$$

其中 V 为右场的时间系数矩阵, 向量形式为:

$$V(t) = \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ \vdots \\ v_m(t) \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

由(2-7), (2-9)式可见, SVD 相当于将左右变量场分解为左右奇异向量的线性组合, 每一对奇异向量和相应的时间系数确定一对 SVD 模态。称 L 和 R 的第 k 列向量 l_k 和 γ_k ($k=1, 2, \dots, m$) 为第 k 对空间型, 称 A 和 B 分别为左场 X 和右场 Y 的展开时间系数矩阵, 称 a_k 和 b_k 分别为左场 X 和右场 Y 的第 k 对展开

时间系数，每对空间型和对应的展开时间系数确定一种模态。每对奇异向量方差贡献为：

$$SCF_k = \lambda_k^2 / \sum_{i=1}^m \lambda_i^2 \quad (2-11)$$

前 k 对奇异向量累计方差贡献为：

$$CSCF_k = \sum_{i=1}^k \lambda_i^2 / \sum_{i=1}^m \lambda_i^2 \quad (2-12)$$

表征前 k 个模态解释的协方差占总协方差的比重($k \leq m$)，由于 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$ ， $CSCF_k$ 愈大，反映前 k 模态占总协方差的部分愈大，愈能用这 k 对展开系数的相互关系表示左场和右场的相互关系。

上述 SVD 方法原理介绍见魏凤英(1999) [14]张礼平(2002) [15]以及胡基福(1996) [16]。

4. MJO 能量异常与海表温度异常(SSTA)的关系

由于 El Niño 事件发生发展过程中，热带太平洋 SST 会发生很大变化，必然会导致局地对流活动异常，所以 MJO 能量会发生波动，以下来分析热带太平洋海表面温度异常(SSTA)与 MJO 能量变化之间的关系。

用 MJO 能量异常数据与 SSTA 数据进行 SVD 分析，得到的第一模态(图 1)方差贡献率为 14%，时间序列长度为 9984，时间序列相关系数为 0.44；第二模态方差贡献率为 5.89%，两个模态彼此独立。图 1 上图中实线和虚线表示 SSTA，填充色表示 MJO 能量异常，下图中红色时间序列表示 SSTA 模态的时间序列，黑色时间序列表示 MJO 能量异常模态的时间序列。

从图 1 上图中来看，MJO 能量异常与 SSTA 之间存在如下关系：SSTA 偏高的区域 MJO 能量异常偏大，SSTA 偏低的区域 MJO 能量异常偏小。在两者相关的主模态中，热带中东太平洋 SSTA 偏低，而热带中太平洋 MJO 能量异常偏小，两者的相关性较好，说明 SSTA 对 MJO 能量有重要影响。

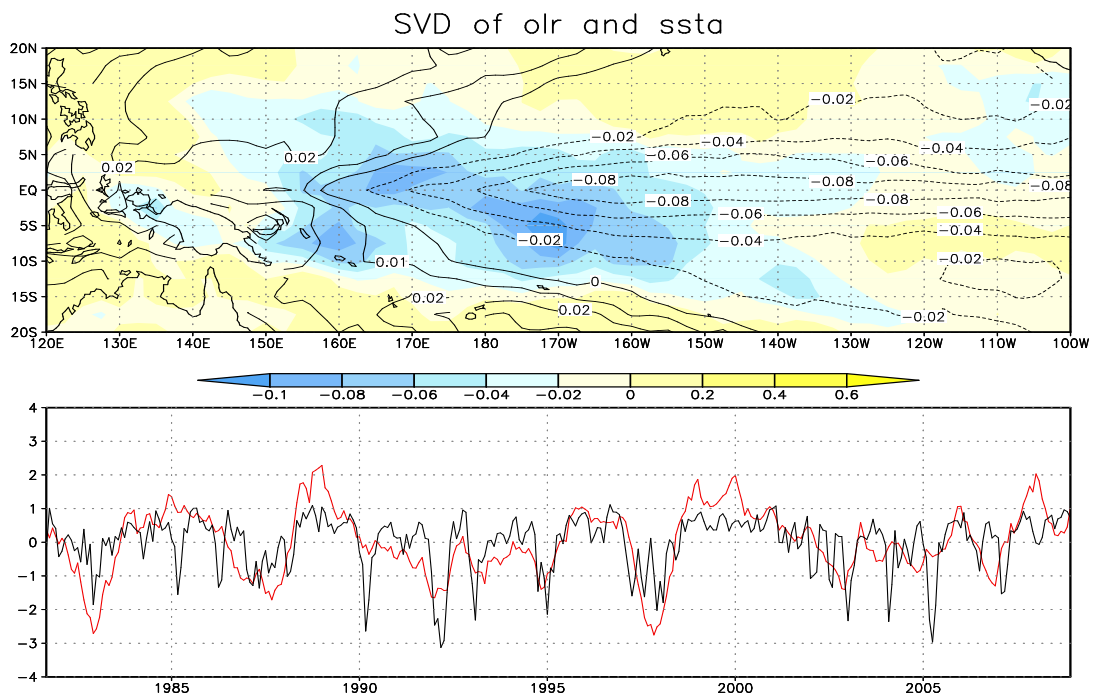


Figure 1. MJO energy abnormalities and SVD analysis of SSTA

图 1. MJO 能量异常与 SSTA 的 SVD 分析

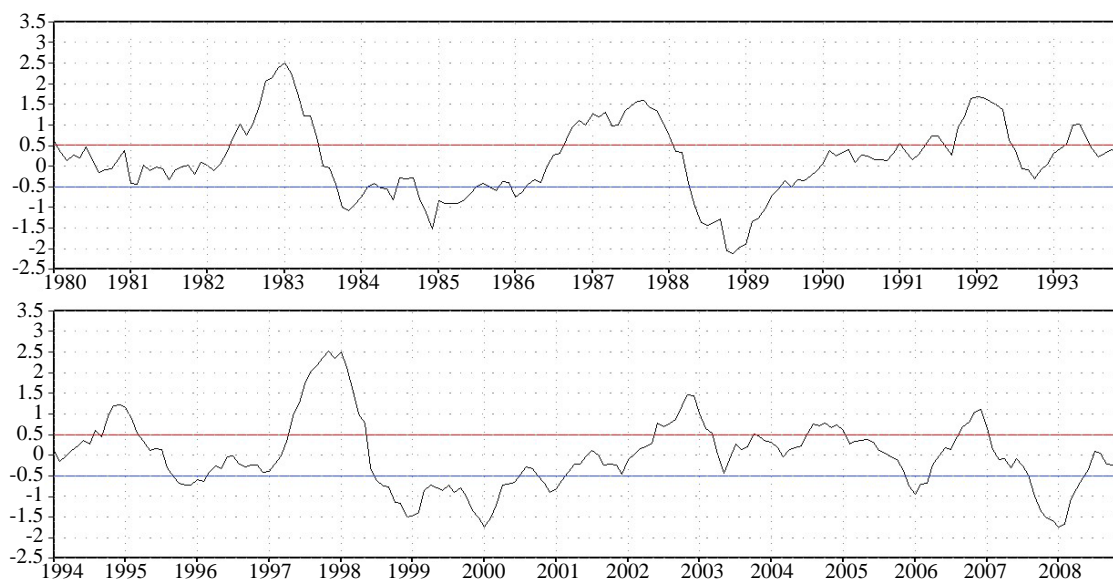


Figure 2. SSTA evolution of Nino 3.4 district

图 2. Nino3.4 区 SSTA 演变

本文中我们使用赤道中东太平洋Nino3.4区(170°W~120°W, 5°S~5°N)的海温距平来确定El Niño的发生, 将Nino3.4区SSTA连续6个月大于0.5°C作为El Niño爆发的标准。考虑对全球范围气候异常的影响, Nino3.4区是一个比较好的区域, 因为这一区域SST的变化对西太平洋降水的改变有最强烈的影响, 而从西太到中太降水区域的变化会极大改变加热区域进而使多数全球性大气环流发生变化。由于OLR资料的时间序列是1980年1月1日~2008年12月31日, 所以在这个时间段(如图2)确定的强El Niño事件有三次, 按强度排序分别为1997~1998年、1982~1983年、1986~1987年。

从图1下图中时间序列的演变来看, MJO能量异常与SSTA正相关性很好。在三次强El Niño事件发生之前, 热带西太平洋海表温度与MJO能量均为正异常状态, 中东太平洋海表温度与MJO能量均为负异常状态, 随着强El Niño事件的发生, 热带西太平洋海表温度持续降低, MJO能量明显衰减, 热带中东太平洋海表温度持续上升, MJO能量明显增强, 表现出很好的同步性; 当强El Niño事件达到成熟阶段时, 热带中东太平洋MJO能量也异常加强; 当强El Niño事件结束后, 热带西太平洋海表温度明显回升, MJO能量显著增强, 热带中东太平洋海表温度持续下降, MJO能量明显减弱。

5. 结论

热带MJO垂直方向表现为斜压结构, 其对流活动以上层风场辐散、下层风场辐合为标志, 对流活动越强, MJO能量越强。当海表面温度(SST)升高, 局地对流活动就会发展, 从而对MJO能量产生积极影响, 反之, 当SST异常偏低时, 局地对流活动就会受到抑制, 对MJO能量产生负面影响。所以, 在强El Niño事件过程中, 由于SST异常变化幅度较大, MJO能量也会产生波动, 当SST异常偏高时MJO能量异常偏大; 当SST异常偏低时MJO能量异常偏小, 两者之间的正相关性表现良好。

参考文献 (References)

- [1] Madden, R.D. and Julian, P. (1971) Detection of a 40-50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **28**, 702-708. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1971\)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2)
- [2] Madden, R.D. and Julian, P. (1972) Description of Global Scale Circulation Cells in the Tropics with 40-50 Day Period.

Journal of the Atmospheric Sciences, **9**, 1109-1123.

[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1972\)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2)

- [3] Lau, K.M. and Chen, P.H. (1986) The 40-50 Day Oscillation and the El Niño/Southern Oscillation: A New Perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **67**, 533-534.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1986\)067<0533:TDOATE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1986)067<0533:TDOATE>2.0.CO;2)
- [4] 李崇银. El Niño 对热带大气季节内振荡的影响[J]. 自然科学进展, 1996, 6(1): 27-33.
- [5] 李崇银, 廖清海. 热带大气季节内振荡激发 El Niño 的机制[J]. 热带气象学报, 1998, 14(2): 97-105.
- [6] Lau, K.M. and Chen, P.H. (1986) Aspects of the 40-50 Day Oscillation during the Northern Summer as Inferred from Outgoing Longwave Radiation. *Monthly Weather Review*, **114**, 1354-1367.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114<1354:AOTDOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114<1354:AOTDOD>2.0.CO;2)
- [7] Weickmann, K.M., Lussy, G.R. and Kutzbach, J.E. (1985) Intraseasonal(30-60 day) Fluctuation of Outgoing Longwave Radiation and 250mb Stream Function during Northern Winter. *Monthly Weather Review*, 941-961.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1985\)113<0941:IDFOOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1985)113<0941:IDFOOL>2.0.CO;2)
- [8] Knutson, T.R. and Weickmann, K.M. (1987) 30-60 Day Atmospheric Oscillations: Composite Life Cycles of Convection and Circulation Anomalies. *Monthly Weather Review*, **115**, 1407-1435.
[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1407:DAOCLC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1407:DAOCLC>2.0.CO;2)
- [9] 龙振夏, 李崇银. 热带底层大气 30-60 天低频动能的年际变化和 ENSO 循环[J]. 大气科学, 2001(25): 798-808.
- [10] 智协飞, 何金海. 北半球中高纬度大气低频变化的若干基本特征[J]. 南京气象学院学报, 1996, 19(1): 76-81.
- [11] Zhang, Y., Wallace, J.M. and Battisti, D.S. (1997) ENSO-Like Interdecadal Variability: 1900-93. *Journal of Climate*, **10**, 1004-1020. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1004:ELIV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2)
- [12] Slingo, J.M., Rowel, D.P. and Sperber, K.R. (1999) On the Predictability of the Interannual Behavior of the Madden-Julian Oscillation and Its Relationship with El Niño. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **125**, 583-609.
- [13] 陈兴跃, 王会军, 曾庆存. 大气季节内振荡及其年际变化[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 15.
- [14] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [15] 张礼平, 柯怡明, 胡江林, 等. SVD 方法在场分析和预测中的应用[J]. 热带气象学报, 2002, 18(3): 237-244.
- [16] 胡基福. 气象统计原理与方法[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1996.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2376-4260, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ams@hanspub.org